

Licence de Physique  
L3 Physique fondamentale ENS-Paris-Saclay

**Travaux Pratiques de Physique**

***Fascicule n°1***

<i>Planning + Salles</i>	<i>p1</i>
<i>Le but de la formation expérimentale</i>	<i>p3</i>
<i>Modalités d'examens</i>	<i>p5</i>
<i>Optique géométrique élémentaire</i>	<i>p7</i>
<i>Ondes dans différents domaines de la physique</i>	<i>p11</i>
<i>Interférences et diffraction</i>	<i>p15</i>
<i>Magnétisme</i>	<i>p21</i>
<i>Physique générale</i>	<i>p29</i>
<i>Interféromètres de Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Pérot</i>	<i>p33</i>



**Planning + Salles**  
**Travaux pratiques de Physique 1<sup>ère</sup> série**  
**Licence L3 ENS-Paris-Saclay**

Les travaux pratiques auront lieu au département de physique de l'ENS-Paris-Saclay le matin de 8h30 à 12h30 et l'après midi de 13h30 à 17h30.

<p><i>Vendredi 4 octobre</i> <i>Vendredi 11 octobre</i></p>	<p style="text-align: center;"><b>Optique géométrique élémentaire</b></p> <p style="text-align: center;">grA matin et grB après-midi grC matin et grD après-midi</p> <p style="text-align: center;">Salle photon 3Z70</p>	<p style="text-align: center;"><b>Ondes</b></p> <p style="text-align: center;">grB matin et grA après-midi grD matin et grC après-midi</p> <p style="text-align: center;">Salles 3Z77 et 3Z74</p>
<p><i>Vendredi 18 octobre</i> <i>Vendredi 8 novembre</i></p>	<p style="text-align: center;"><b>Interférences et diffraction</b></p> <p style="text-align: center;">grA matin et grB après-midi grC matin et grD après-midi</p> <p style="text-align: center;">Salle photon 3Z70</p>	<p style="text-align: center;"><b>Magnétisme</b></p> <p style="text-align: center;">grB matin et grA après-midi grD matin et grC après-midi</p> <p style="text-align: center;">Salles 3Z77 et 3Z74</p>
<p><i>Vendredi 15 novembre</i> <i>Vendredi 22 novembre</i></p>	<p style="text-align: center;"><b>Michelson et Fabry-Perot</b></p> <p style="text-align: center;">grA matin et grB après-midi grC matin et grD après-midi</p> <p style="text-align: center;">Salle photon 3Z70</p>	<p style="text-align: center;"><b>Changement d'états</b></p> <p style="text-align: center;">grB matin et grA après-midi grD matin et grC après-midi</p> <p style="text-align: center;">Salles 3Z77 et 3Z74</p>



## **Le but de la formation expérimentale**

Le but premier d'une formation expérimentale est de vous permettre d'acquérir une certaine autonomie et un esprit critique vis à vis d'une expérience quelconque. Pour cela, il est nécessaire de connaître et de savoir utiliser le matériel d'instrumentation courant, présent dans beaucoup de laboratoires, ainsi que divers dispositifs expérimentaux que l'on rencontre souvent en physique. L'outil informatique est aussi devenu indispensable pour l'acquisition et le traitement des données expérimentales.

- **Savoir utiliser le matériel d'instrumentation d'usage courant:**

L'utilisation des instruments de base, tel que l'oscilloscope, doit rapidement devenir transparente et l'étudiant doit s'interdire de jouer indifféremment sur la base de temps ou le calibre pour stabiliser une trace rétive, sans se poser la question du signal qu'il faut utiliser pour le déclenchement. De même, si on souhaite repérer une température, il faut commencer par se demander quel sera le capteur le mieux adapté à cette mesure. Si une présentation exhaustive de tous les types de matériel est bien évidemment irréaliste, un des principaux buts de cette formation expérimentale sera par conséquent d'acquérir les "bons réflexes" de l'expérimentateur.

- **Acquérir un esprit critique vis à vis des expériences:**

Une fois l'expérience faite, qu'elle soit satisfaisante ou non, il est nécessaire d'avoir un esprit critique vis-à-vis des résultats obtenus et estimer l'incertitude finale. Il importe également de garder présent à l'esprit que toute méthode de mesure (même celle qui pourrait vous être proposée dans la séance de travaux pratiques) n'est pas forcément la plus judicieuse, aussi bien du point de vue conceptuel que du choix de l'appareillage utilisé.

- **Apprendre à concevoir et réaliser soi-même une expérience de physique:**

Ce travail passe par une succession d'étapes :

- 1) Choisir l'expérience la mieux adaptée pour l'étude qu'on se propose d'effectuer et qui permette de dégager ses paramètres pertinents
- 2) Concevoir le dispositif expérimental, et choisir le matériel en vue de sa réalisation avec une précision suffisante
- 3) Analyser les résultats quantitatifs obtenus, savoir les exploiter de façon pertinente et estimer la précision des mesures qui ont été effectuées
- 4) Noter l'ensemble de ce travail dans son "cahier de laboratoire" et éventuellement enregistrer les fichiers de données ainsi que les graphes sur un support informatique fiable.

## Quelques conseils pour le travail en travaux pratiques

- **Le cahier de laboratoire**

Pour tout travail expérimental, il est fondamental de conserver une trace de tout ce qui a été fait. Il est donc nécessaire de prendre des notes pendant la réalisation d'une expérience. Dans les laboratoires de recherche, une habitude est d'utiliser un **cahier de laboratoire**. Ainsi, toutes les personnes concernées par l'avancement de l'expérience savent où se trouve l'information: *dans le "cahier de manip"* ! Même si cela peut apparaître comme une simple affirmation dogmatique, ce cahier a une grande importance pour y consigner jour après jour les expériences réalisées quelque soit leur sujet, les mesures effectuées sur le dispositif expérimental, les idées de "manips", les références bibliographiques, etc. Il n'est pas rare de voir les étudiants qui préparent l'agrégation de physique, utiliser leur "vieux" cahier de manips afin de refaire plus efficacement certaines expériences délicates. On se demande souvent ce qu'il est nécessaire de faire figurer dans un cahier de manip, quant à la concision ou aux détails. Il n'existe évidemment aucune règle, mais l'expérience révèle que des notes bien prises doivent ensuite pouvoir permettre de refaire une expérience, quelques années après que cette dernière ait été réalisée, ou de réinterpréter les résultats obtenus. Quelques points sont toutefois essentiels pour un travail optimal:

1) Mettre le titre de la manipulation ainsi qu'un très bref résumé pour décrire ce que l'on cherche à mesurer ou à mettre en évidence.

2) En premier lieu il est nécessaire de découvrir et de tester le matériel en essayant de comprendre le fonctionnement des différents appareils ainsi que les réglages spécifiques. Ne pas hésiter à faire quelques mesures "à blanc" pour se faire la main et pour tester l'étendu des résultats expérimentaux attendus. Dans un premier temps on pourra noter les résultats des essais sur un cahier de brouillon à part (le cahier de laboratoire n'est pas un cahier de brouillon ...)

3) Une fois la prise en main de l'expérience bien réalisée, on passe sur le cahier de manip en décrivant le dispositif expérimental par des schémas simples et clairs en indiquant les procédures de réglages des différents appareils, sans oublier de noter les petits "trucs de manips" propres à chaque expérience et expérimentateur.

4) Puis faire les mesures et reporter les **résultats bruts** sur le cahier sans faire de conversion ou de calcul sur une valeur lue. La prise d'un point de mesure doit s'accompagner, en même temps, de l'estimation de son incertitude associée lorsque cela est possible.

5) Analyse et exploitation des résultats et incertitudes afin d'obtenir la ou les valeurs expérimentales pertinentes associées au modèle. Commentaires et conclusion si nécessaire.

D'un point de vue pratique, vous avez à votre disposition ordinateurs et imprimante en réseau pour pouvoir entrer vos données et tracer vos graphes (logiciel IGOR). Il est conseillé d'imprimer et de **coller** les graphes et autres images dans votre cahier pour ne pas laisser de feuilles volantes. Il est aussi très utile et conseillé de préparer la séance de TP avant de venir. Vous pouvez, par exemple, reporter sur votre cahier le modèle théorique concernant l'expérience ainsi que des références bibliographiques.

Quelques conseils pour débiter : pensez à **bien aérer vos notes** de manière à pouvoir ensuite y rajouter des commentaires, un titre ou toute information utile. Attention à ne pas réécrire sur des données : il vaut mieux les barrer clairement pour écrire la nouvelle valeur à côté de manière à pouvoir la lire sans aucune ambiguïté.

## Modalités d'examens

L'évaluation du module de Physique expérimentale de la Licence Phytem repose sur deux notes :

- Note de 1<sup>er</sup> semestre: "contrôle continu" + examen écrit de TP
- Note de 2<sup>ème</sup> semestre: "tutorat expérimental"

- **Note de 1<sup>er</sup> semestre: "contrôle continu" + examen écrit de TP**

La note de contrôle continu est donnée par l'ensemble des enseignants qui participent à l'encadrement des Travaux Pratiques. Elle est la synthèse de leurs différents avis sur plusieurs points tels que: la qualité de la rédaction des comptes rendus d'expériences qui sont sur le cahier de laboratoire, la participation active en TP, la capacité à faire fonctionner correctement le matériel et les manipulations (au moins à la fin de la séance !), l'autonomie, le soin dans la prise des données expérimentales, l'exploitation judicieuse des mesures avec évaluation des incertitudes. Les résultats expérimentaux, obtenus lors des séances de manipulation, doivent être obligatoirement consignés dans le cahier de laboratoire et une vérification de la qualité de la rédaction sera effectuée régulièrement. Les cahiers seront ramassés et étudiés à la fin du 1<sup>er</sup> semestre comptant pour une bonne part dans la note de 1<sup>er</sup> semestre de "contrôle continu". Une note finale sera attribuée individuellement et pourra être différente entre les deux membres d'un même binôme. Un examen écrit de TP sera aussi organisé à la fin du premier semestre. Cet examen consistera en une série de petites questions sur par exemple la mise en place de tel TP, le réglage de tel appareil, le résultat attendu sur telle expérience ect ect ...

- **Note de 2<sup>ème</sup> semestre: "tutorat expérimental"**

La note de 2<sup>ème</sup> semestre est basée sur un examen oral de TP qui se déroulera de la façon suivante :

- Votre binôme est convoqué le matin à 8h, 9h, 10h ou 11h au département de physique de l'ENS-Paris-Saclay. A votre arrivée à l'heure indiquée sur le planning, vous venez retirer votre sujet auprès des techniciens du département. Le tirage d'un sujet se fait complètement au hasard en fonction de la disponibilité du matériel et des salles. Vous trouverez ci-dessous un exemple de sujets expérimentaux proposés l'année dernière.
- Vous travaillez ensuite en binôme à la préparation de votre sujet expérimental durant 6 heures avec l'aide d'un technicien pour sortir et mettre en place le matériel. Au cours de cette préparation, vous devrez mettre en œuvre et exploiter plusieurs expériences illustrant le sujet. L'expérience principale est indiquée entre parenthèses et concerne une expérience déjà effectuée en TP et que vous aurez à refaire obligatoirement mais pas forcément en entier, devant les deux examinateurs. Une ou plusieurs autres "petites" expériences de votre choix, en rapport avec le sujet, viendront compléter la présentation orale (vous avez une totale liberté dans ce choix qui ne se fera pas obligatoirement dans les TP déjà réalisés). Tous les documents sont autorisés durant l'épreuve (notes, tables, cahier de manip, internet ....).
- Les expériences préparées seront présentées aux interrogateurs. La présentation dure environ 40 minutes et doit être équitablement partagée dans le binôme. Il est vivement conseillé de faire au tableau, un plan comportant un bref résumé des diverses expériences proposées, et le cas échéant les résultats déjà obtenus en préparation. Vous referez obligatoirement quelques prises de mesures que vous exploiterez "en direct" devant les examinateurs. Une petite modélisation peut parfois être utile pour expliquer les phénomènes physiques, mais il s'agit ici d'une épreuve expérimentale. A la suite de cette présentation, les interrogateurs vous poseront diverses questions pendant 15 minutes environ. Une note finale sera attribuée individuellement à chacun d'entre vous.

**Exemples de sujet posés:**

*Exemple de sujets :* (le numéro du sujet correspond à l'expérience de TP)

- 2- Propagation d'ondes dans différents domaines de la physique.**  
(chaîne linéaire d'oscillateurs)
- 3- Oscillateurs dans différents domaines de la physique.**  
(cavité Laser)
- 4- Cavités résonnantes**  
(cavités résonnantes en acoustique)
- 6- Interférences dans différents domaines de la physique.**  
(interféromètre de Michelson utilisé pour la spectroscopie en transformée de Fourier)
- 7- Propagation et transfert de chaleur. Changement d'état.**  
(module à effet Peltier-Seebeck)
- 8- Formation des images en optique. Aberrations.**  
(Etude du microscope optique)
- 9- L'électron: Effet tunnel. Diffraction + ....**  
(Microscope à effet Tunnel STM )
- 10- Phénomènes de polarisation**  
(Polarisation de la lumière, ellipsométrie)
- 11- Spectroscopie**  
(effet Zeeman)
- 12- Magnétisme**  
(effet Hall)



# Optique géométrique élémentaire

## **Poste n°1:    *Lentilles convergentes : Formule de conjugaison - Formule de Newton.***

Faire l'image d'un objet diffusant à l'aide d'une lentille convergente. Schéma des rayons.

- Applications numériques de la formule de conjugaison de Descartes et de la formule de Newton. Quelles sont les approximations utilisées pour obtenir ces formules ?
- Etablir la relation entre les deux positions de la lentille permettant d'obtenir une image nette. En déduire la distance minimum objet-écran pour pouvoir faire une image réelle ?
- Evaluer la distance focale de la lentille convergente par la méthode d'autocollimation.
- Réaliser un faisceau de lumière parallèle. Commentaires.

## **Poste n°2 :    *Lentille divergente - association de lentilles***

- Identifier, par une méthode simple et rapide, la lentille divergente et la lentille convergente ?
- Dans quel cas peut-on obtenir une image réelle à l'aide d'une lentille divergente ?
- Faire l'image de l'objet diffusant en utilisant deux lentilles, une convergente et une divergente. Schéma des rayons. Notion d'image et d'objet réels, virtuels. Grandissement transverse.

## **Poste n°3 :    *Miroir plan. Miroir sphérique***

Faire l'image d'un objet à l'aide d'un miroir convergent. Schéma des rayons.

- A l'aide d'un compas faire le schéma d'un miroir sphérique convergent réel de distance focale assez courte (typiquement quelques centimètres) et tracer la marche exacte (1<sup>ère</sup> loi de Descartes  $\alpha=\alpha'$ ) de différents rayons lumineux parallèles à l'axe optique. Notion d'aberration sphérique et définition de la distance focale.
- Estimer la distance focale du miroir convergent à l'aide d'une méthode d'autocollimation.
- Peut-on faire l'image d'un objet à l'aide d'un miroir plan ? Y a-t-il présence d'aberrations géométriques dans ce cas ? Pourquoi observe-t-on une image réelle lorsque l'on se regarde dans un miroir plan ?

## **Poste n°4:    *Approximation de Gauss - Aberration sphérique (Tableau magnétique)***

On utilise une lentille plan-convexe en plexiglas ( $n=1,5$  ;  $R=8\text{cm}$ ) que l'on éclaire normalement à sa face plane par plusieurs faisceaux de lumière parallèle entre eux.

- Identifier les rayons paraxiaux et marginaux. Comment sont définies les distances focales pour une lentille "épaisse" ? Peut-on mesurer directement cette distance focale ?
- Faire le calcul à l'aide de la formule :  $\frac{1}{f'} = (n - n_0) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$
- Mesurer l'aberration sphérique longitudinale (écart entre le foyer image marginal et le foyer image paraxial). Qu'est-ce que l'approximation de Gauss ?
- Retourner la lentille. Observations. Règle des '4P' : Plus Plat Plus Près.

### Poste n°5 : *Technique de projection d'une image. Rôle du condenseur*

Dans un premier temps on enlèvera le condenseur optique (composé de deux lentilles plan-convexe de grand diamètre et de courte focale) situé en avant de la lampe blanche (attention ce dernier est fragile et peut être très chaud). On éclaire ensuite directement une grille dont on fait l'image sur un écran à l'aide d'une lentille de grande ouverture.

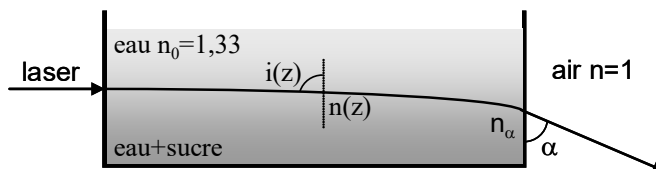
- Observations. Peut-on améliorer l'image de cette grille en replaçant le condenseur sur la lampe ? Où est située l'image du filament de la lampe dans ce cas précis ?

### Poste n°6 : *Gradient d'indice*

On dispose d'une grande cuve contenant un mélange eau + sucre ou sel, dont la concentration varie suivant la profondeur. Pour obtenir ce résultat, nous avons, dans un premier temps, réalisé une solution saturée en sucre ou sel puis nous avons ensuite versé délicatement de l'eau pure en surface (le long de la paroi de la cuve). L'indice optique étant fonction de la concentration, nous avons en fait réalisé ici un milieu présentant un gradient d'indice suivant la direction verticale repérée par  $z$ .

- Dans quel sens est dirigé le gradient d'indice ? Où sont situées les surfaces équi-indices ?
- Peut-on énoncer ici une formule générale du type Snell-Descartes en utilisant l'angle de réfraction  $i(z)$  dans ce milieu d'indice  $n(z)$  continûment variable.
- On suppose que le faisceau laser pénètre dans le milieu juste en haut du gradient où l'indice est approximativement celui de l'eau pure. En mesurant l'angle d'émergence  $\alpha$  du faisceau laser en sortie de cuve, déterminer l'indice de réfraction de sortie  $n_\alpha$  donné par la formule:

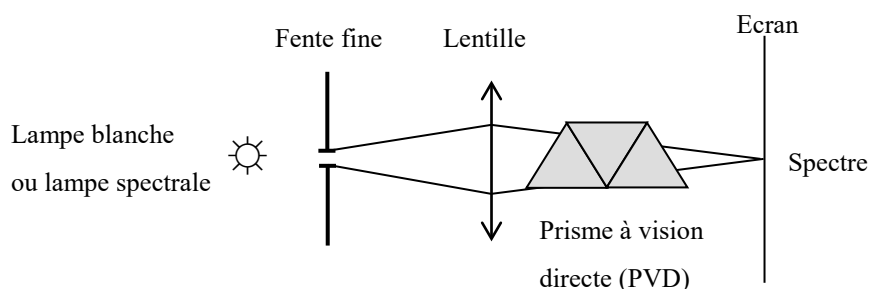
$$n_\alpha = \sqrt{n_0^2 + (n \cos \alpha)^2}, \text{ que l'on redémontrera.}$$



### Poste n°7 : *Décomposition de la lumière. Projection d'un spectre*

Pour obtenir le spectre d'une source lumineuse quelconque, il faut tout d'abord faire l'image d'une fente fine sur un écran, puis intercaler un système dispersif (prisme à vision directe ou réseau) sur le trajet du faisceau lumineux.

- Observer le spectre de la lumière blanche et celui de la lumière issue d'une lampe spectrale. Commentaires.
- Quel est l'influence de la fente source et de la qualité de l'image sur le spectre ?



## Optique géométrique élémentaire

### Matériel

**Poste n°1 :    *Lentille convergente : Formule de conjugaison et formule de Newton.***

- 1 doublet  $f=20$  cm. 1 miroir plan
- Une lampe blanche
- 1 petit diaphragme.
- 1 objet diffusant (lettre sur diffuseur)
- 1 écran. 1 réglet de 1 m.

**Poste n°2 :    *Lentille divergente : association de lentilles***

- 1 doublet  $f=20$  cm. 1 lentille divergente  $f=-15$ cm. 1 miroir plan.
- Une lampe blanche
- 1 objet diffusant (lettre sur diffuseur)
- 1 écran. 1 réglet 1m.

**Poste n°3 :    *Miroir plan. Miroir sphérique.***

- 1 miroir sphérique. 1 miroir plan. 1 lentille  $f=20$ cm.
- Une lampe blanche
- 1 objet diffusant (lettre sur diffuseur)
- 1 petit écran sur pied. 1 réglet de 1 m.

**Poste n°4 :    *Aberrations sphériques (Tableau magnétique)***

- Tableau magnétique + accessoires.
- 1 réglet 20 ou 30 cm.

**Poste n°5 :    *Technique de projection d'une image. Rôle du condenseur.***

- Lentille grande ouverture (marquée ab.sphérique). Diaphragme grand diamètre.
- Une lampe blanche.
- 1 grille. 1 dépoli. 1 écran.

**Poste n°6 :    *Gradient d'indice***

- Grande cuve en plexiglas avec solution saturée en sucre + support élévateur
- Ampoule à décanter.
- 1 laser
- Un écran. Un réglet.

**Poste n°7 :    *Décomposition de la lumière. Projection d'un spectre.***

- 1 doublet  $f=20$  cm. 1 écran. 1 fente réglable en angle et en largeur.
- Une lampe blanche. Une lampe Hg (hp).
- 1 prisme à vision directe. Boite réseaux + support.



## **Ondes dans différents domaines de la physique: mécanique, électromagnétisme, physique quantique**

### **Poste n°1 : La cuve à ondes**

Un générateur de fréquence réglable permet de générer des ondes à la surface d'un liquide (de l'eau dans notre cas). Un système optique associant un stroboscope, un miroir plan et un écran dépoli permet de visualiser ces ondes.

- A l'aide d'une seule source générant des ondes sphériques, mesurer la vitesse de propagation des ondes sur l'eau. De quels paramètres dépend cette vitesse ? Illustrer l'effet Doppler.
- Visualiser les interférences entre deux ondes sphériques provenant de deux sources ponctuelles synchrones. Identifier les différents ordres d'interférences associés aux hyperboloïdes. Que se passe-t-il lorsque l'on fait varier la distance entre les deux sources ?

### **Poste n°2 : Corde vibrante. Plaque vibrante**

Une corde non extensible est soumise à une excitation sinusoïdale à l'une de ses extrémités. Une masse  $m$  est reliée à la deuxième extrémité par l'intermédiaire d'une poulie.

- Quel système d'ondes observe-t-on le long de la corde ? Existe-t-il des fréquences particulières pour lesquelles on observe une résonance ? Effectuer les mesures de fréquences au stroboscope.
- Calculer expérimentalement la vitesse de propagation de l'onde mécanique le long de la corde. Comparer avec la valeur théorique  $v = \sqrt{T/\mu}$ ,  $T$  étant la tension de la corde et  $\mu$  sa masse linéique. Précision.
- A l'aide de sable très fin, visualiser les modes de vibration d'une plaque métallique vibrante. Commentaires.

### **Poste n°3 : Guide d'ondes centimétriques. Propagation libre et guidée**

Les ondes centimétriques sont émises par une diode à effet Gunn, et se propagent dans un guide d'onde métallique de section rectangulaire  $a \times b$  ( $a=22,86\text{mm}$  ;  $b=10,16\text{mm}$ )

- En réalisant une onde stationnaire à l'intérieur du guide, mesurer la longueur d'onde  $\lambda_g$  dans le guide (une antenne coulissante sur le guide permet de mesurer une tension proportionnelle à l'intensité de l'onde en un point donné).
- Mesurer la longueur d'onde  $\lambda_0$  de l'onde se propageant librement dans l'air en réalisant un interféromètre de Michelson (mettre un cornet adaptateur en sortie du guide).
- Les résultats expérimentaux sont-ils conformes à la théorie donnée par la relation de dispersion

du mode dominant  $TE_{10}$  se propageant à l'intérieur de ce guide d'onde : 
$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{4a^2}$$

(à l'aide de cette formule on calculera  $\lambda_{g \text{ théorique}}$  attendue en utilisant les valeurs de  $\lambda_0$  et  $a$  et on comparera avec la valeur expérimentale obtenue  $\lambda_{g \text{ expérimentale}}$ )

- A-t-on dépassé la vitesse de la lumière à l'intérieur du guide d'ondes sachant que la fréquence de l'onde électromagnétique est identique dans le guide et dans l'air ?

**Poste n°4 :    *Onde de De-Broglie associée à l'électron. Diffraction d'électrons***

Un filament de tungstène, chauffé par effet joule sous une tension de 6,3 Volts, émet des électrons de faible vitesse. Soumis à une tension accélératrice  $V$  ( $V \approx 0$  à 5 kVolts), ces derniers forment un faisceau homocinéétique de vitesse  $v$ .

- Ecrire la relation de De-Broglie reliant la longueur d'onde de l'électron  $\lambda$  à sa vitesse  $v$ . Relier  $\lambda$  à  $h$ ,  $e$ ,  $m_e$  et  $V$ .

Lorsque ce faisceau d'électrons tombe sur une surface cristalline, il se diffracte suivant la relation de Bragg :  $2d\sin\theta = n\lambda$  (voir notice)

- Identifier les différents termes de cette expression.
- La cible cristalline utilisée ici est sous forme de poudre. Qu'observe-t-on sur l'écran fluorescent déposé sur le fond du tube à vide ?
- Déterminer la longueur d'onde des électrons sachant que la cible est composée de graphite de réseau hexagonal comportant deux distances caractéristiques  $d_1 = 2,13 \text{ \AA}$  et  $d_2 = 1,23 \text{ \AA}$ .  
 $D_{\text{cible-écran}} = 13,5 \text{ cm}$ . Précision. Comparer avec la valeur obtenue précédemment avec la tension accélératrice  $V$ .

**Attention:** Ne pas faire fonctionner le tube plus de quelques minutes sous peine de détérioration.

**Poste n°5 :    *Etude qualitative de l'effet photoélectrique***

On appelle *effet photoélectrique* l'extraction d'électrons de la matière sous l'effet de la lumière. Ce phénomène physique fut interprété par Einstein en 1905 en introduisant la quantification de la lumière, décrite en terme de photon d'énergie  $E = h\nu$ .

La loi décrivant l'effet photoélectrique s'écrit:

$$E_c = h\nu - W_0$$

où  $h\nu$  est l'énergie du photon incident,  $W_0 > 0$  le travail de sortie caractéristique du matériau (généralement un métal) et  $E_c$  l'énergie cinétique de sortie de l'électron une fois celui-ci arraché au métal.

D'après cette formule, on constate que ce phénomène apparaît seulement lorsque la fréquence de la lumière incidente dépasse une valeur seuil donnée par:  $\nu_0 = \frac{W_0}{h}$ , en dessous de laquelle aucun électron n'est émis, quelle que soit l'intensité lumineuse du faisceau incident.

Nous nous proposons ici de réaliser une expérience qualitative consistant à éclairer avec une lampe spectrale à vapeur de mercure, émettant entre autre un rayonnement UV, une plaque de zinc fraîchement décapée. Cette plaque est relié à un électroscope permettant de mesurer la charge électrostatique à sa surface. Réaliser et interpréter les trois expériences suivantes:

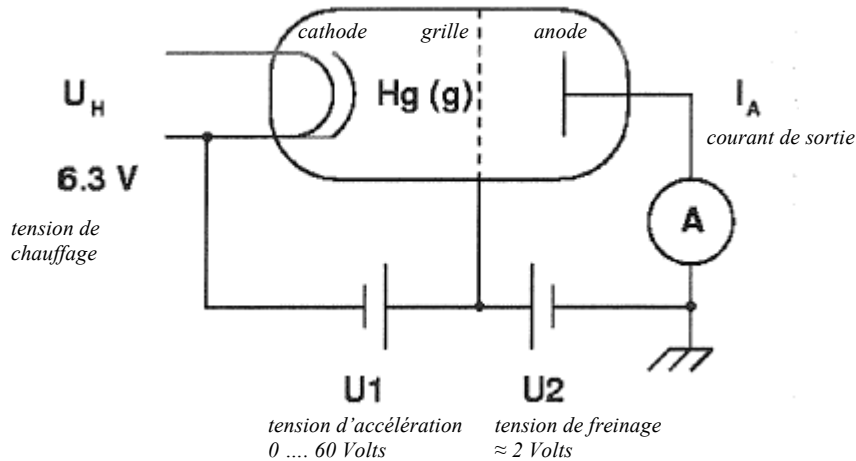
- a) La plaque de zinc est chargée négativement à l'aide d'un bâton plastique. Elle se décharge sous l'action de l'éclairement de la lampe spectrale.
- b) Si on interpose une plaque de verre, la décharge est arrêtée.
- c) La plaque de zinc est chargée positivement *par influence* avec le même bâton plastique. Aucune décharge n'est observée en éclairant avec la lampe Hg.

On pourra aussi mettre en évidence l'influence d'une baguette chargée sur un filet d'eau.

**Poste n°6 :    Quantification des niveaux d'énergie: expérience de Frank et Hertz**

En 1914, J.Franck et G.Hertz, qui travaillaient sur les énergies d'ionisation des atomes, ont mis en évidence la quantification des niveaux d'énergie de l'atome de mercure en provoquant des collisions avec des électrons incidents dont l'énergie cinétique est ajustable.

Dans ce TP, nous nous proposons de reproduire cette expérience historique, en utilisant un tube de Frank et Hertz à vapeur de mercure, monté dans un four électrique dont la température  $T$  est ajustable. Ce type de tube possède 3 électrodes comme indiqué sur le schéma ci-dessous :



- 1) La cathode chauffée émet des électrons de vitesse très faible
- 2) L'électrode intermédiaire sous forme de grille, sur laquelle une tension positive  $U_1$  est appliquée, permet d'accélérer ces mêmes électrons jusqu'à une énergie  $eU_1$
- 3) L'anode collectrice, sur laquelle une tension négative  $U_2$  est appliquée par rapport à la grille, provoque le freinage des électrons. Seuls les électrons possédant une énergie  $eU_1 > eU_2$ , au niveau de la grille, peuvent atteindre l'anode et participer au courant de sortie d'intensité  $I_A$ .

L'expérience consiste tout d'abord à chauffer le tube de manière à ce que le mercure liquide se transforme en vapeur ( $T \approx 175 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Les électrons émis par la cathode, peuvent alors entrer en collision avec les atomes de mercure suivant deux types de chocs: des chocs élastiques, dans lesquels les électrons gardent leur énergie initiale, et des chocs inélastiques, où les électrons cède de l'énergie aux atomes de mercure faisant passer les électrons atomiques du niveau fondamental vers un niveau d'énergie supérieur (situé ici à  $4,9 \text{ eV}$   $\lambda = 253,6 \text{ nm}$ )

- Visualiser sur l'oscilloscope la courbe d'évolution du courant de sortie  $I_A$  en fonction de la tension accélératrice  $U_1$ , et observer qu'elle présente plusieurs creux séparés d'une tension  $\Delta V$  que l'on mesurera (il y a un facteur /10 en sortie de l'appareil). Interpréter.
- A l'aide de cette valeur  $\Delta V$  calculer la longueur d'onde correspondante à la transition fondamentale du mercure considérée ici.

on donne :  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

# Ondes dans différents domaines de la physique: mécanique, électromagnétisme, physique quantique

## Matériel

### **Poste n°1 : La cuve à ondes**

- Cuve à onde remplie d'eau + accessoires
- Réglet de 20-30cm

### **Poste n°2 : Corde vibrante. Plaque vibrante.**

- Corde de Melde + vibreur + GBF + amplificateur (vibreur à fixer au double face sur le support).
- Plaque vibrante + vibreur + caisse en plexiglas + sable fin + GBF + amplificateur
- Masse à crochet 200g. Stroboscope. Balance électronique de précision (0,01g).
- bout de corde de Melde (environ 2m ou plus si possible)

### **Poste n°3 : Guide d'ondes centimétriques. Propagation libre et guidée. Polarisation.**

- Guide d'ondes centimétriques + détecteur sur pied.
- 2 plaques métalliques + 1 plaque en plexiglas + supports.
- 1 oscilloscope numérique. Réglet 50 cm.

### **Poste n°4 : Onde de De-Broglie associée à l'électron. Diffraction d'électrons**

- Système tube à diffraction d'électrons + notice.
- Alimentation tube : chauffage 6,3 V avec Haute tension (0 à 6 kVolts avec affichage précis de la tension)

### **Poste n°5 : Etude qualitative de l'effet photoélectrique**

- Plaque de zinc + électroscope
- lampe Hg avec raie UV (enveloppe quartz)
- bâton plastique + peau de chat + morceau de couverture
- plaque de verre + support sur pied

### **Poste n°6 : Expérience de Frank et Hertz**

- Système Frank et Hertz PHYWE
- Oscilloscope numérique



## INTERFERENCES-DIFFRACTION

### Poste n°1 : *Diffraction par un bord d'écran. Point de Poisson*

Enoncer le principe de Huygens-Fresnel. Notion de diffraction à l'infini.

Différents objets diffractants seront éclairés à l'aide d'un faisceau laser élargi et épuré.

- Visualiser les figures de diffraction d'un bord d'écran (lame de rasoir), d'un fil épais (il est conseillé de placer l'écran assez loin de façon à observer les franges situées à l'intérieur de l'ombre géométrique du fil) et d'une bille sphérique (faire légèrement converger le faisceau autour de la bille pour bien observer le point lumineux appelé "point de Poisson").

### Poste n°2 : *Diffraction à l'infini. Mesures par la diffraction*

On éclaire différents objets diffractant directement avec un faisceau laser simple.

- Visualiser la figure de diffraction à l'infini d'une fente fine, d'une fente rectangulaire, ainsi que celle d'une ouverture circulaire. Commentaires. A partir de quelle distance peut-on parler de diffraction à l'infini ?
- A l'aide de leurs figures de diffraction à l'infini déterminer les caractéristiques géométriques des objets suivant : cheveu, poudre de lycopodes (spores circulaires). Enoncer le théorème des écrans complémentaires (théorème de Babinet).

On donne l'intensité diffractée par une fente  $a \times b$  :

$$I(u, v) = I_0 \sin^2(\pi u a) \sin^2(\pi v b) \quad \text{avec} \quad u = \frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{\lambda} \quad \text{et} \quad v = \frac{\sin \beta - \sin \beta_0}{\lambda}$$

et l'intensité diffractée par une ouverture circulaire de diamètre D :

$$I(Z) = I_0 \left[ \frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2$$

où  $J_1(Z)$  est la fonction de Bessel d'ordre 1 avec  $Z = \pi D \sqrt{u^2 + v^2}$ . Le premier minimum de la fonction de Bessel est obtenu pour  $Z=3,83$  correspondant au premier anneau noir de la tache d'Airy. Les angles  $\theta$  et  $\beta$  étant petits, on a la relation :  $\sqrt{u^2 + v^2} \approx \frac{R}{\lambda L}$  ou R est le rayon premier anneau noir mesuré sur la tache d'Airy et L la distance où l'on a placé l'écran.

### Poste n°3: *Interférences et diffraction : fentes d'Young et réseaux*

L'intensité diffractée à l'infini par N fentes de largeur a et distante de d est donnée par :

$$I_N = I_{0N} \sin^2(\pi u a) \left[ \frac{\sin(N\pi u d)}{N \sin(\pi u d)} \right]^2 \quad \text{avec} \quad I_{0N} = N^2 I_{01}$$

On donne dans le complément ci-joint les figures de diffraction par une fente  $I_1(u)/I_{01}$ , par deux fentes  $I_2(u)/I_{02}$  et par N fentes  $I_N(u)/I_{0N}$ . Commentaires. Intérêt des réseaux ?

- Deux fentes d'Young sont éclairées directement par un faisceau laser. Visualiser sur un écran la figure de diffraction à l'infini. Interpréter.
- 3,4,6,14 fentes sont éclairées successivement par un faisceau laser. Interpréter les différentes figures de diffraction obtenues sur l'écran et comparer avec la théorie (voir graphes)
- Faire de même avec un réseau de diffraction. Les pics lumineux observés sont-ils dus à l'interférence ou à la diffraction ?
- Par une méthode la plus précise de votre choix, déterminer expérimentalement la longueur d'onde du laser.

**Poste n°4 : Interférences en lumière blanche**

- A l'aide des différents dispositifs interférentiels proposés visualiser sur un écran ou sur la caméra CCD couleur, les franges d'interférences en lumière blanche.

**Poste n°5 : Diffraction acoustique**

Une onde ultrasonore ( $\approx 6\text{Mhz}$ ), générée par un cristal de quartz piézo-électrique, se propage dans une cuve remplie d'éthanol pur. Le réseau d'indice créé par cette onde est susceptible de diffracter un faisceau lumineux.

- Etudier la figure de diffraction à l'infini du faisceau traversant la cuve. Commentaires.
- En déduire la célérité de l'onde ultrasonore dans l'éthanol ( $v \approx 1150\text{m/s}$ ). On supposera ici que la formule des réseaux habituelle est applicable.

**Attention :** Les tensions utilisées sont de l'ordre de 380 Volts. Ne rien débrancher et ne rien brancher sur l'alimentation. Un câble coaxial branché uniquement sur l'oscilloscope servira d'antenne pour capter les signaux haute fréquence émis par le dispositif expérimental.

**Poste n°6 : Franges d'égale épaisseur d'une lame de savon**

Les franges d'égale épaisseur s'observent couramment dans la nature sous forme d'irisations à la surface de bulles de savon ou de flaques recouvertes d'une pellicule huileuse par exemple. Un simple film de savon tendu sur un cadre permet de réaliser facilement de telles expériences spectaculaires.

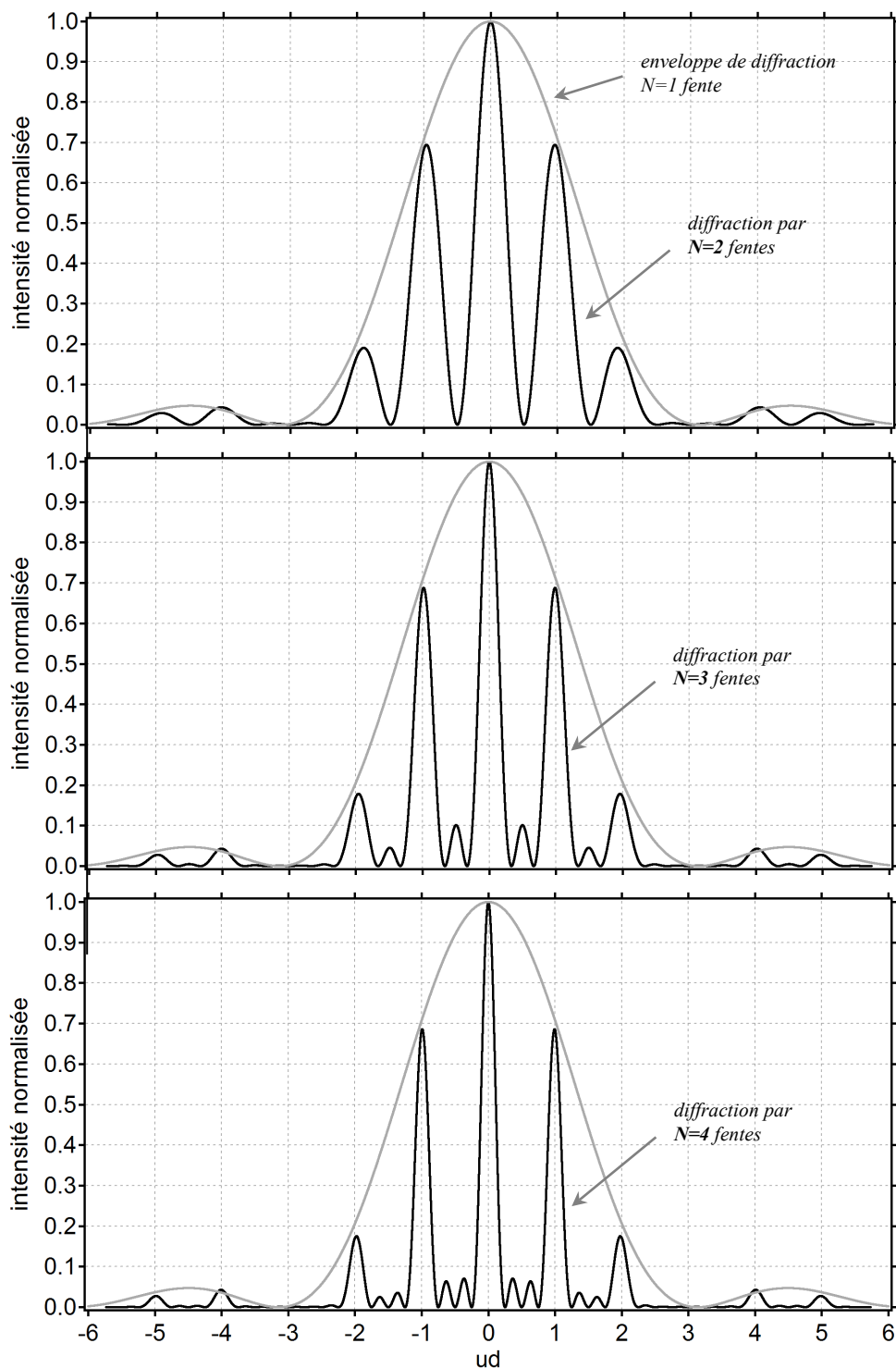
- Réaliser une lame de savon sur le cadre métallique qui sera éclairé avec une lampe blanche. Où sont localisées les interférences ? Projeter les franges d'interférences en réflexion sur un écran à l'aide d'un miroir plan et d'une lentille.
- Comment évolue cette figure d'interférence au cours du temps ? Interprétations.

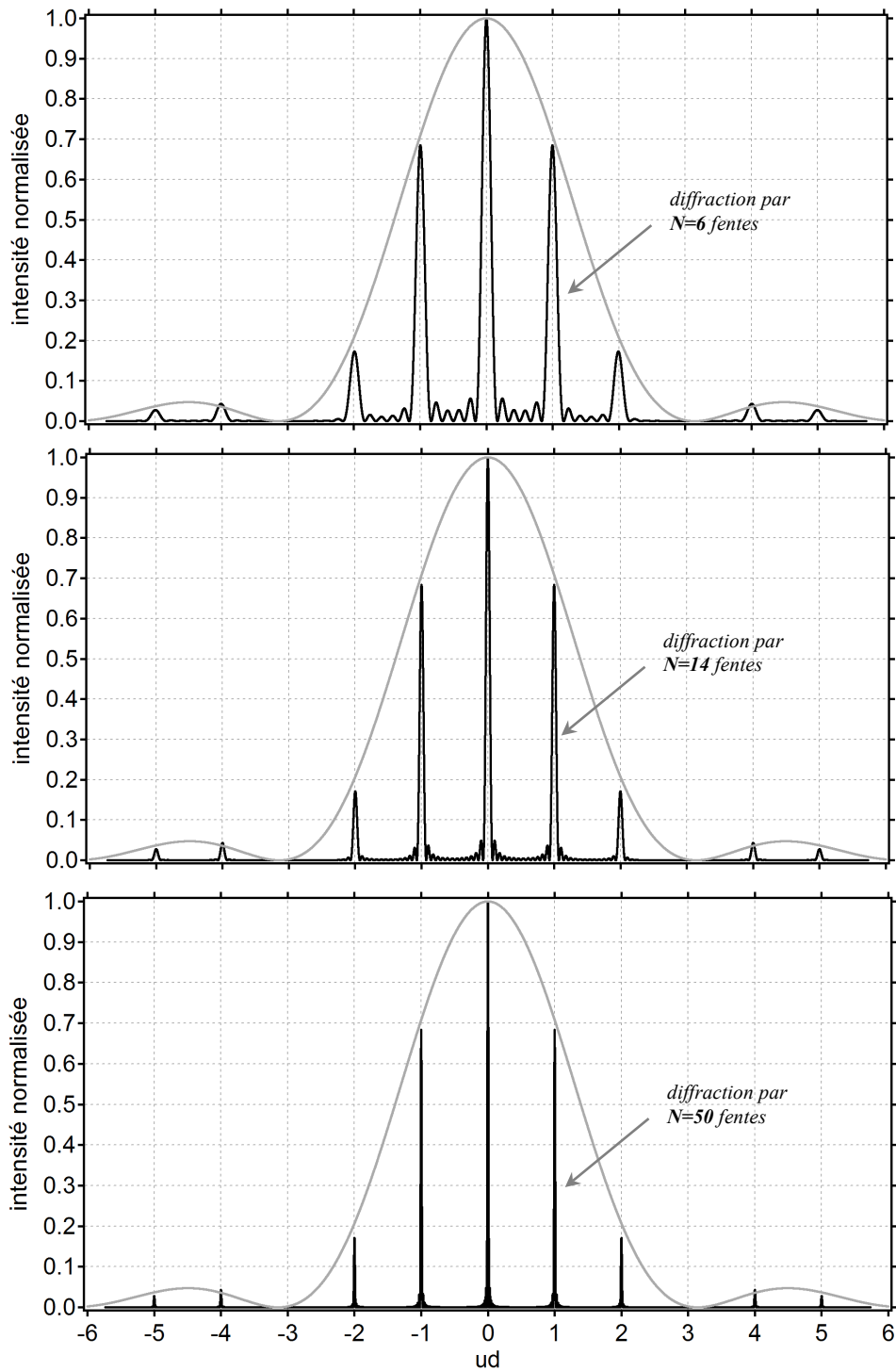
**Compléments sur les réseaux (diffraction par N fentes)**

Tracé de l'intensité diffractée par N fentes de largeur  $a$  distante de  $d$  (Logiciel IGOR):

$$I_N = I_{0N} \sin^2(\pi u a) \left[ \frac{\sin(N\pi u d)}{N \sin(\pi u d)} \right]^2 \quad \text{avec } I_{0N} = N^2 I_{01} \quad \text{et} \quad u = \frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{\lambda}$$

Ci-dessous les cas N=1, N=2 (fentes d'Young), N=3, N=4, N=6, N=14 et N=50 fentes diffractantes (on a posé:  $d/a=3$  et intensité normalisée  $I_N/I_{0N}$ )





- La position des pics d'interférences ne dépend pas bien sûr du nombre  $N$  de fentes éclairées ( $d$  idem), mais l'intensité de ces pics varie comme  $N^2$  et leur largeur comme  $1/N$ .

**Plus on a d'ondes qui interfèrent, et plus le pic est fin et lumineux → intérêt des réseaux**

- La formule des réseaux repérant les pics d'interférences est donnée par la relation :

$$ud = k(\text{entier}) \quad \Rightarrow \quad \sin \theta - \sin \theta_0 = \frac{k \lambda}{d} = kp\lambda$$

(ici le pic à  $k=3$  est absent du fait de la valeur  $d/a=3$  choisie.  $p=1/d$  est le pas du réseau).

La formule des réseaux est aisément retrouvable par un calcul simple de différence de marche entre deux fentes distantes de  $d$  dans le cas de la diffraction à l'infini.

## Interférences et diffraction

### Matériel

#### **Poste n°1 : Diffraction par un bord d'écran. Point de Poisson.**

- 1 laser épuré. Doublet  $f=20$  cm.
- 3 fils épais sur support. Point de Poisson (bille métallique sur support). Lame de rasoir.

#### **Poste n°2 : Diffraction à l'infini. Mesures par la diffraction**

- 1 diode laser verte
- 1 ouverture rectangulaire (réglable si possible)
- 1 fente fine réglable en largeur.
- 1 trou de 100 à 200 $\mu\text{m}$  + support. Poudre de lycopodes. Cheveu + support.
- 1 réglet de 20-30cm et 1 mètre à ruban.
- Trous circulaires, rectangulaires,

#### **Poste n°3 : interférences et diffraction : fentes d'Young et réseaux**

- 1 diode laser verte. Boîte de réseaux + supprt.
- Fentes d'Young. Trous d'Young sur support en verre
- 1 réglet 20 ou 30 cm et 1 mètre à ruban.
- 3,4,6,14 fentes sur support en verre

#### **Poste n°4: Interférences en lumière blanche**

- Lampe blanche. Fente fine réglable en largeur et en angle.
- Biprisme. Miroir de Fresnel. Fentes d'Young. 1 lentille  $f=20\text{cm}$
- Filtre anticalorique. Caméra Flexcam + moniteur couleur

#### **Poste n°5 : Diffraction acoustique**

- Système piézo-électrique + Cuve remplie d'éthanol pur.
- 2 alimentations Leybold 380Volts 6Mhz
- 1 laser He-Ne. 1 oscillo numérique. 1 réglet de 1m.

#### **Poste n°6 : Franges d'égale épaisseur d'une lame de savon**

- Lampe blanche. 1 miroir plan. 1 doublet  $f=20\text{cm}$ . 1 écran.
- Cadre métallique + potence. Filtre anticalorique.
- Solution stable pour lame de savon dans un petit béccher + papier essui-tout.



# Magnétisme

## **Poste n°1 : Paramagnétisme. Diamagnétisme. Courants de Foucault**

La mise en évidence des propriétés paramagnétique ou diamagnétique de certaines substances s'effectuera à l'aide d'un aimant permanent très puissant formé d'un alliage **Néodyme-Fer** possédant la densité d'énergie magnétique la plus élevée que l'on sache réaliser actuellement.

- Observer l'alignement d'un tube d'aluminium dans les lignes de champ magnétique et montrer qu'un barreau de verre se met perpendiculairement à ces mêmes lignes de champ (voir compléments).
- Mettre en évidence les courants de Foucault avec le matériel à votre disposition.

## **Poste n°2 : Mesure de la susceptibilité diamagnétique de l'éthanol**

Un tube en verre de petit diamètre, rempli d'éthanol, possède une extrémité graduée que l'on introduit très délicatement dans l'entrefer d'un électro-aimant au niveau de la surface du liquide. Lorsque l'éthanol est soumis à un gradient de champ magnétique, la force résultante fait descendre le liquide dans le tube. La très faible valeur de la susceptibilité diamagnétique de l'éthanol explique la petite variation du niveau (quelques dixièmes de mm), mesurable uniquement par une méthode optique impliquant un fort grandissement ( $\times 40$  au moins).

- Mesurer la faible variation du niveau d'éthanol dans le tube produite par le champ magnétique.  
**Attention:** en présence du champ magnétique les pièces polaires de l'électro-aimant se resserrent, veillez donc à choisir un écartement légèrement plus grand pour éviter de casser le tube. Noter la valeur maximum du courant acceptable pour les bobines et vérifier de temps en temps, au toucher, une éventuelle surchauffe.
- Mesurer la valeur du champ magnétique dans l'entrefer à l'aide du teslamètre.
- En déduire la valeur de la susceptibilité magnétique de l'éthanol présent dans le tube. Précision.  
les tables donnent :  $\chi_{\text{éthanol}} = -9,1 \cdot 10^{-6}$        $\rho_{\text{éthanol}} = 0.79 \text{ g/cm}^3$

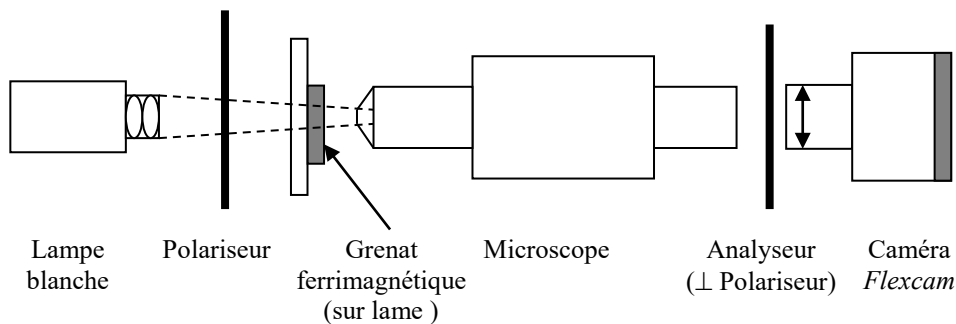
## **Poste n°3 : Polarisation rotatoire magnétique ou effet Faraday**

Certaines substances deviennent optiquement actives lorsqu'elles sont soumises à un champ magnétique parallèle à la direction de propagation de la lumière : c'est l'effet Faraday. Un barreau cylindrique en verre Flint est susceptible de présenter cet effet magnéto-optique en présence d'un champ magnétique. Sous l'influence de ce champ, on constate une rotation de la direction de polarisation d'un faisceau lumineux traversant le barreau. L'angle de rotation  $\theta$  est donné par la relation :  $\theta = V B L$  avec  $L = 30 \text{ mm}$  la longueur du barreau et  $V$  la constante de proportionnalité de Verdet dépendant de la longueur d'onde du faisceau lumineux.

- Placer le barreau dans l'entrefer d'un électro-aimant entre deux polariseurs croisés (à  $B=0$ )
- Mesurer l'angle de rotation de la polarisation lorsque l'on applique le champ et mesurer le champ magnétique dans l'entrefer à l'aide du teslamètre.
- En déduire la constante de Verdet de ce matériau. Précision.

#### **Poste n°4 : Observation des domaines de Weiss**

Vous disposez d'un échantillon constitué d'une couche mince de grenat ferrimagnétique, possédant des domaines magnétiques de "grandes dimensions" (quelques microns !). Pour des champs extérieurs appliqués inférieurs au champ de saturation, ce matériau devient polydomaines, chaque domaine étant séparé de son voisin par une paroi de Bloch. La visualisation de ces domaines est rendue possible grâce à la rotation de la polarisation que leur aimantation locale rémanente produit par effet Faraday sur un faisceau de lumière blanche polarisée. L'analyseur (polariseur) placé derrière l'échantillon permet alors de faire apparaître un contraste entre les domaines dont l'aimantation est dirigée dans des sens opposés. On réalisera le montage suivant et on observera l'influence d'un barreau aimanté :



- Mesurer la taille caractéristique des domaines de Weiss (calibration avec une mire micrométrique graduée)
- Mesurer l'angle de rotation dû à l'effet Faraday.

#### **Poste n°5: Phénomène de magnétostriction**

Lorsqu'une barre de matériau ferromagnétique de longueur  $L$  est soumise à un champ magnétique extérieur, elle va se contracter ou se dilater suivant le matériau utilisé. Ce phénomène est appelé magnétostriction caractérisée par l'allongement algébrique  $\Delta L$  positif ou négatif.

Vous disposez d'un interféromètre de Michelson, d'une diode laser de longueur d'onde  $\lambda=656nm$  possédant un objectif escamotable et d'une barre ferromagnétique (Fer ou Nickel) sur laquelle est fixé un miroir plan (miroirs très fragiles: attention en posant les barres sur la table)

- Régler le Michelson afin d'obtenir des anneaux bien contrastés et assez grands.
- Etudier le comportement du système lorsqu'on augmente le courant  $I$  parcourant le solénoïde ( $I$  varie de 0 à 2A). Tracez la courbe donnant l'allongement relatif  $\Delta L/\lambda$  en fonction  $I$ .



**Poste n°6 : Mesure du rapport  $e/m_e$**

Des électrons, émis par un filament de tungstène chauffé, sont accélérés sous une différence de potentiel réglable  $U$  pour former un faisceau homocinétique. Ce faisceau d'électron se propage dans un ballon en verre contenant une atmosphère raréfiée d'hydrogène permettant de visualiser la trajectoire des électrons par fluorescence. Deux bobines d'Helmholtz de rayon  $R$ , parcourues par un courant d'intensité  $I$ , produisent un champ magnétique  $\vec{B}$  perpendiculaire à la trajectoire des électrons (voir compléments).

- Exprimer le rapport  $e/m_e$  en fonction de  $U$ ,  $B$  et  $r$  le rayon de la trajectoire des électrons.
- Dans notre configuration expérimentale, nous considérerons que le champ  $B$  est homogène sur toute la trajectoire du faisceau d'électron. Un calcul simple nous donne sa valeur :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{R} \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2}$$
  $N$  étant le nombre de spire d'une bobine. Exprimer numériquement le rapport  $e/m_e$  en fonction des paramètres mesurés  $U$ ,  $I$  et  $r$ . Mesure de  $e/m_e$  et incertitudes.

On donne :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

**Poste n°7 : Champ magnétique terrestre : boussole des tangentes**

On propose de déterminer expérimentalement la valeur de la composante horizontale  $B_H$  du champ magnétique terrestre. On utilise pour cela une méthode permettant de mesurer l'angle de déviation d'une aiguille aimantée soumise au champ magnétique  $B_0$  créé par une ou plusieurs spires parcourues par un courant  $I$ . La direction prise par cette aiguille est alors la résultante des deux champs  $B_0$  et  $B_H$ .

- Etudier un protocole expérimental permettant de mesurer assez précisément l'angle de déviation de l'aiguille aimantée. Quel est l'intérêt ici d'utiliser un inverseur de courant ? (Interrupteur bipolaire double monté en inverseur)
- Faire une mesure permettant d'évaluer la valeur du champ magnétique terrestre. Incertitudes. valeur tabulée :  $B_H = 2 \cdot 10^{-5}$  Tesla.

I) Phénoménologie

Toute substance est formée d'un ensemble d'atomes ou de molécules qui peuvent ou non présenter un moment magnétique permanent. Le *diamagnétisme* concerne les substances qui ne possèdent pas de moment magnétique permanent, le *paramagnétisme* concerne les substances dont les moments magnétiques permanents sont sans interactions mutuelles. Les substances comportant des atomes ou molécules dont les moments magnétiques permanents sont en forte interaction mutuelle donnent naissance au *ferro, antiferro et ferrimagnétisme*.

Le *diamagnétisme* trouve son origine dans la modification du mouvement orbital des électrons sous l'influence d'un champ magnétique appliqué à la substance. Selon la loi de Lenz, les courants induits donnent naissance à un flux d'induction opposé à la variation du champ appliqué. Ce magnétisme est aussi présent pour les atomes ou molécules présentant aussi un moment magnétique, mais il est si faible qu'il est totalement masqué par les autres phénomènes magnétiques. Le diamagnétisme ne dépend généralement pas de la température.

Le *paramagnétisme* trouve généralement son origine dans l'alignement des moments magnétiques permanents des atomes ou molécules sous l'influence d'un champ magnétique appliqué à la substance, faisant ainsi apparaître une aimantation induite parallèle au champ. Cette aimantation est d'autant plus faible que la température est élevée, c'est à dire que l'agitation thermique est importante (loi de Curie).

II) Mise en évidence

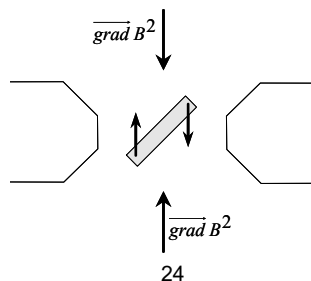
La mise en évidence expérimentale du diamagnétisme et du paramagnétisme est obtenue par l'intermédiaire d'un champ magnétique inhomogène généré dans l'entrefer d'un électroaimant ou d'un aimant permanent. Un calcul simple montre que la force volumique exercée est fonction du gradient de champ magnétique ainsi que de la susceptibilité magnétique  $\chi_m$  propre à la substance étudiée :

$$\vec{f} = \frac{\chi_m}{2\mu_0} \overrightarrow{\text{grad}} B^2$$

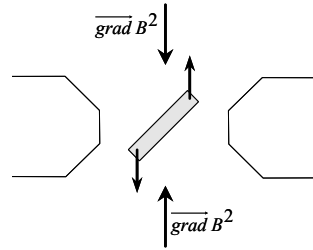
$\chi_m$  est le facteur de proportionnalité entre le vecteur aimantation  $\vec{M}$  et le champ  $\vec{H}$  appliqué :  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  (en général on a  $\chi_m \ll 1$ )

Deux cas se présentent suivant le signe de la susceptibilité :

- \*  $\chi_m > 0$  La substance est dite **paramagnétique**. La force est alors dirigée dans le sens du gradient de champ magnétique. Elle tend alors par exemple à aligner un barreau d'aluminium parallèlement aux lignes de champ ou à dévier un filet d'oxygène liquide que l'on fait couler dans l'entrefer d'un électro-aimant.



- \*  $\chi_m < 0$  La substance est dite **diamagnétique**. La force est alors dirigée à l'opposé du gradient de champ magnétique. Elle tend alors par exemple à aligner un barreau de verre perpendiculairement aux lignes de champ.



### III) Mesure de susceptibilité magnétique

Un tube en verre, rempli du liquide à étudier, possède une extrémité graduée que l'on introduit dans l'entrefer d'un électro-aimant. A l'équilibre la somme des densités volumiques des forces auquel est soumis un petit élément de volume doit être nulle :

$$\vec{\rho g} - \vec{\text{grad}} p + \frac{\chi_m}{2\mu_0} \vec{\text{grad}} B^2 = \vec{0}$$

avec  $p$  la pression du fluide,  $\rho$  sa masse volumique et  $\chi_m$  la susceptibilité magnétique.

En écrivant le champ de pesanteur  $\vec{g}$  sous la forme  $\vec{g} = -\vec{\text{grad}}(gz)$ , l'intégration de cette relation donne :

$$-\rho gz - p + \frac{\chi_m}{2\mu_0} B^2 = cte$$

Si on applique cette relation entre les deux surfaces libre de la solution, on obtient finalement la formule reliant la dénivellation  $h$  à la susceptibilité  $\chi_m$  :

$$\chi_m = \frac{2\mu_0 \rho g h}{B^2}$$

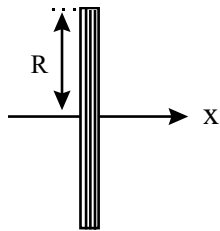
Les tables donnent :

- eau pure  $\chi_{eau} = -9.10^{-6}$
- éthanol  $\chi_{éthanol} = -9,1 .10^{-6}$
- méthanol  $\chi_{méthanol} = -8,4 .10^{-6}$
- acétone  $\chi_{acétone} = -7,3 .10^{-6}$

**Compléments: Champ magnétique créé par des bobines d'Helmholtz**

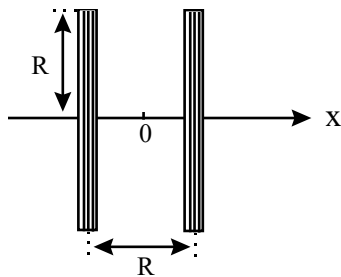
Les bobines d'Helmholtz sont constituées de deux bobines identiques circulaires de même axe, de même nombre  $N$  de spires, de même rayon  $R$ , distantes de  $R$  l'une de l'autre.

Une seule bobine, possédant  $N$  spires, traversée par un courant d'intensité  $I$  donne un champ magnétique  $B$  sur l'axe  $Ox$  :



$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2\right)^{3/2}}$$

Deux bobines donnent respectivement un champ magnétique  $B_1$  et  $B_2$  sur l'axe  $Ox$  :



$$B_1(x) = \frac{\mu_0 NI}{2R} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{R}\right)^2\right)^{3/2}}$$

$$B_2(x) = \frac{\mu_0 NI}{2R} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{R}\right)^2\right)^{3/2}}$$

Le champ créé en un point quelconque  $x$  est donc donné par :

$$\vec{B}(x) = \vec{B}_1(x) + \vec{B}_2(x)$$

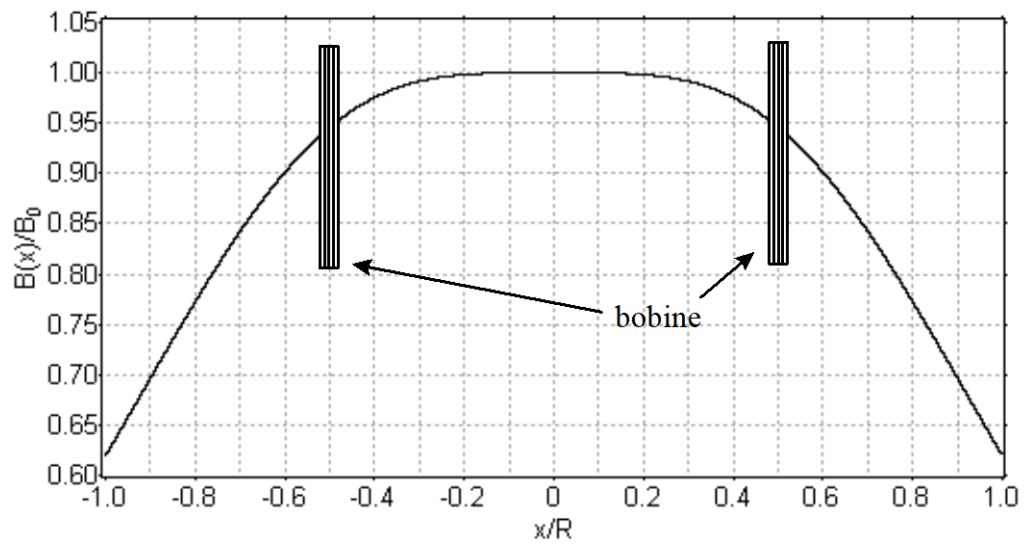
Deux cas sont alors possible suivant le sens de parcours du courant et donc suivant le sens des deux champs magnétiques.

1<sup>er</sup> cas : Champs magnétiques de même sens :  $B(x) = B_1(x) + B_2(x)$

On trace ci-dessous (avec le logiciel IGOR) la fonction normalisée  $\frac{B(x)}{B_0}$  en fonction de la variable

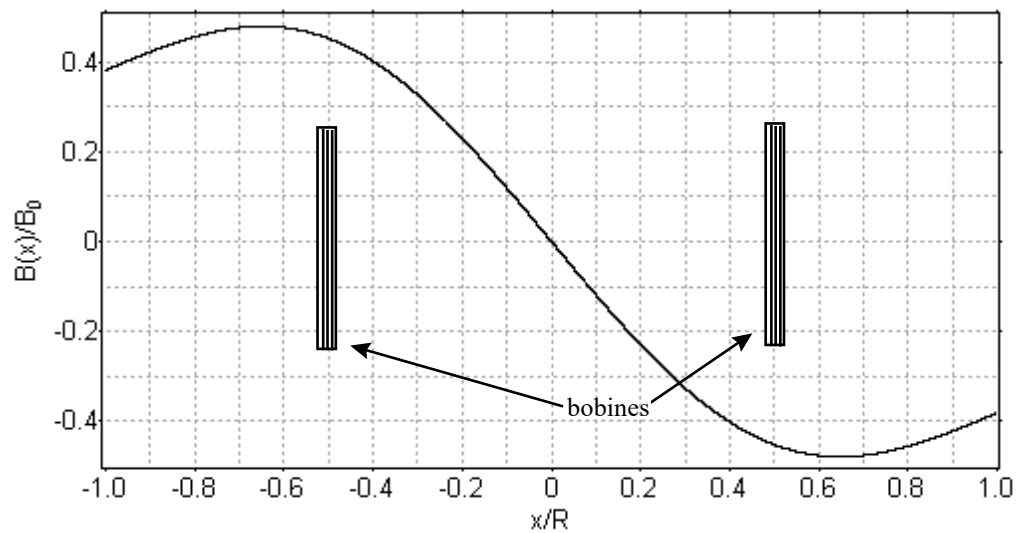
$\frac{x}{R}$  avec la valeur  $B_0 = B(x=0) = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 NI}{R}$  qui est celle en général utilisée pour les bobines

d'Helmholtz :



2<sup>ème</sup> cas : Champs magnétiques de sens opposé :  $B(x) = B_1(x) - B_2(x)$

On trace ci-dessous la fonction normalisée  $\frac{B(x)}{B_0}$  en fonction de la variable  $\frac{x}{R}$  :



Le champ s'annule en  $x=0$ .

L'emplacement des bobines est indiqué sur les graphes.

## Matériel Magnétisme

### **Poste n°1 : Paramagnétisme. Diamagnétisme. Courants de Foucault**

- Aimant permanent PASCO + accessoires ( barreau de verre, tube d'aluminium, etc..)

### **Poste n°2 : Mesure de la susceptibilité diamagnétique de l'éthanol**

- Tube de Quincke propre + support + pipette d'éthanol
- Gros électro-aimant + alimentation spécifique
- Teslamètre
- Lampe blanche + doublet  $f=10\text{cm}$  (impérativement monté sur aluminium) + filtre anticalorique

### **Poste n°3 : Polarisation rotatoire magnétique ou effet Faraday**

- Barreau de Flint pour effet Faraday.
- Petit électro-aimant avec pièces polaires percées+ alimentation spéciale
- Diode laser verte + 2 polariseurs + teslamètre.
- Notice ENSC 047

### **Poste n°4 : Observation des domaines de Weiss**

- Une lampe blanche.
- 1 polariseur. Microscope avec objectif  $\times 10$  ou  $\times 15$  ou  $\times 20$  . Barreau aimanté.
- Grenat ferrimagnétique. Caméra Flexcam + moniteur couleur.
- Notice ENSC 468 + mire micrométrique graduée.

### **Poste n°5 : Phénomène de magnétostriction**

- Système Magnétostriction sur banc d'optique
- Alimentation stabilisée + réglet 20cm

### **Poste n°6 : Mesure du rapport $e/m_e$**

- Système tube à déviation d'électron + Bobines d'Helmholtz.
- Alimentation tube chauffage 6,3 V et Haute tension (0 à 200 Volts).
- Multimètre lumineux. Réglet 50cm.
- Alimentation à affichage lumineux pour bobines.

### **Poste n°7 : Champ magnétique terrestre : boussole des tangentes**

- Boussole des tangentes + grande aiguille aimantée
- Alimentation (max 2 ou 3 A) + interrupteur bipolaire protégé (Pierron en salle d'électricité)

# Physique générale

## 1 Surfusion de l'étain

Cette expérience a pour but de montrer le passage par un état métastable lors d'une solidification avec peu de perturbations. Enregistrer à l'aide d'un thermocouple plongeant dans l'étain (une fois solide) la température lors de la solidification et repérer la zone de métastabilité. Comparer votre mesure de la température de solidification de l'étain à celle tabulée dans le *Handbook of Chemistry and Physics*.

## 2 Point triple du diazote N<sub>2</sub>

Cette expérience consiste en la mise en évidence de l'équilibre simultané des 3 phases, gaz, liquide et solide, du diazote, et en la mesure des paramètres thermodynamiques (pression  $P_{tr}$  et température  $T_{tr}$ ) du point triple pour lequel cela se produit.

$$P_{tr} = 12,463 \text{ kPa (soit } 93,5 \text{ mm Hg ou } 123 \text{ mbar)}$$

$$T_{tr} = 63,15 \text{ K (soit } -210,00 \text{ °C)}$$

Pour observer le point triple, il est donc nécessaire de placer le diazote liquide dans une enceinte où nous faisons le "vide". Cette enceinte est formée d'un vase Dewar chapeauté par un couvercle traversé notamment par un thermocouple de type T.

**Les capteurs de pression.** Deux manomètres à lame d'acier, montés sur un raccord en croix, indiquent la *pression absolue* dans l'enceinte. L'un d'eux donne une indication grossière de pression, tandis que l'autre est capable de mesurer une pression inférieure à 160 mbar avec une sensibilité de l'ordre de 1 mbar. Rmq : le couvercle de l'enceinte est également équipé d'un capteur de pression *différentielle* (il mesure la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte) de type piezorésistif. Ce capteur est compensé en température, et sa gamme de mesure est de 0 à 15 psi (!), à savoir 1034,25 mbar.

**Le thermomètre :** Dans la gamme de température qui nous concerne ( $t < 200 \text{ °C}$ ), les lecteurs de sonde de Platine commerciaux sont inopérants. Il faut avoir recours aux thermocouples de type T. La précision combinée de la sonde et du lecteur conduit à une lecture précise à 0,1 °C, mais exacte à seulement 1 °C.

**Manipulations** (la mise en place de l'expérience et l'utilisation de la pompe à vide se fera sous la supervision de votre encadrant de TP)

1. Remplir environ la moitié du vase Dewar d'azote liquide.
2. Connecter la pompe au couvercle et l'allumer en maintenant au début le couvercle du vase appuyé sur le vase Dewar pour assurer l'étanchéité. Qu'observez-vous après quelques minutes ?
3. Relever la pression au point critique (quel moment choisissez-vous pour votre mesure?).

## 3 Isothermes de SF<sub>6</sub> et Opalescence critique

Vous disposez d'un tube renforcé, rempli de SF<sub>6</sub>, dont on peut faire varier le volume par l'intermédiaire d'une colonne de mercure, ainsi que la température par un système de bain thermostaté. La température et la pression critique du SF<sub>6</sub> sont d'environ  $T_c = 46 \text{ °C}$  et  $P_c = 37 \text{ bars}$

1. Etudier et visualiser qualitativement les différents changements de phase du SF<sub>6</sub>
2. Tracer une isotherme pour une température  $T < T_c$ . Commentaires.

## 4 Supraconductivité

Le matériau étudié est un alliage de type YBaCuO dont la température de transition normal  $\rightarrow$  supra est de l'ordre de  $-185^{\circ}\text{C}$ .

**Mise en évidence de l'état supraconducteur** Elle se fait avec un disque de supraconducteur et un petit aimant puissant néodyme-fer. **Attention** à ne pas choquer le disque de supraconducteur qui est très friable Deux effets caractéristiques peuvent être observés. Ils se manifestent tous les deux par la lévitation du petit aimant au dessus du supra.

**Résistivité nulle dans l'état supra** Tremper le supra. posé sur le trépied spécial dans un petit Dewar contenant de l'azote liquide, puis déposer avec une pince le petit aimant au dessus. A quoi la lévitation est-elle due dans ce cas selon vous ?

**Diamagnétisme parfait de l'état supra** (effet Meissner) Tremper cette fois le supra. avec l'aimant déjà dessus dans l'azote liquide. Observer que l'aimant se soulève très légèrement. A quoi la lévitation est-elle due dans ce cas ?

## 5 Transition ferromagnétique $\rightarrow$ paramagnétique

Un clou en fer est suspendu au bout d'un fil et maintenu incliné par rapport à la verticale avec un aimant. Avec un bec Bunsen, on chauffe le clou en prenant garde de ne pas chauffer l'aimant (mettre l'écran thermique entre les deux). Que se passe-t-il ? Refaire la même expérience avec un thermocouple possédant un manchon en fer au bout. Mesurer la température de Curie. Que pensez-vous de votre mesure ?

## 6 Capillarité : Loi de Jurin

Des tubes capillaires de rayon  $R$  sont plongés dans de l'éthanol 96 %. Il est demandé de vérifier que la hauteur  $h$  d'ascension du liquide dans ces tubes est inversement proportionnelle au rayon  $R$ . La loi de Jurin s'exprime par l'équation suivante :

$$h = \frac{2\gamma \cos(\theta)}{\rho g R}$$

$\theta$  est l'angle de contact entre le liquide et la paroi du tube. Cet angle est considéré comme nul dans les conditions expérimentales.  $\gamma$  représente le coefficient de tension superficielle du liquide.  $\rho$  est la masse volumique du liquide ( $789 \text{ kg/m}^3$  à  $20^{\circ}\text{C}$ ).

Déterminer la tension superficielle de l'éthanol ( $\gamma_{ethanol} = 2.2 \times 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}$ )

## 7 Mesure de la viscosité du glycerol

Vous disposez d'un tube rempli de glycérol, de viscosité  $\eta$ , et de billes de verre de rayon  $r$  assez petit.

1. Etudier les différentes étapes de la chute libre d'une bille dans le glycérol.
2. La force de frottement fluide est proportionnelle à la vitesse de chute de la bille. Le coefficient de proportionnalité est donné par la loi de Stokes :  $6\pi r\eta$ , valable pour un régime laminaire non turbulent. En déduire  $\eta$  (en Pa.s ou décapoise).
3. Quels sont les paramètres expérimentaux qui influent sur la valeur de  $\eta$  ?

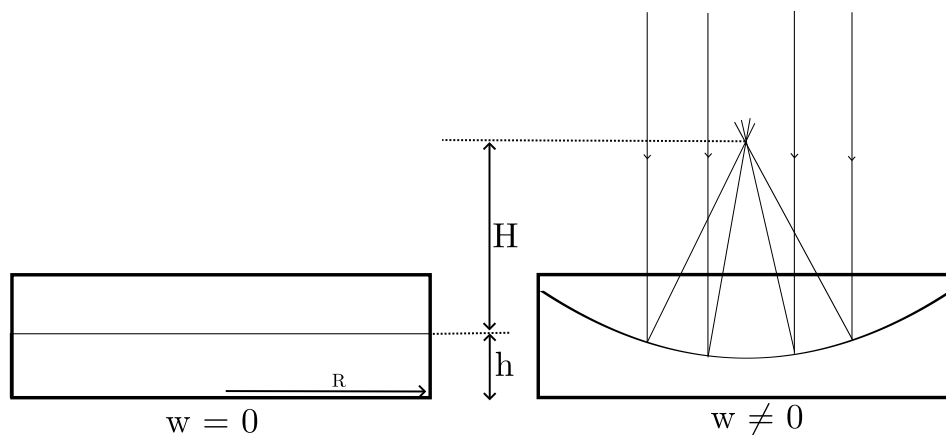
Valeur tabulée sur la viscosité du glycérol selon le *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th edition*

Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	Viscosité (Pa.s)
20	1.46
25	0.934



## 8 Force centrifuge : déformation de la surface libre

Un cristalliseur est placé sur une tour de potier et rempli d'eau jusqu'à une hauteur  $h$ . Lorsque le cristalliseur est mis en rotation (fréquence angulaire  $w$ ), sous l'effet de la force centrifuge, la surface libre du liquide adopte une forme parabolique.



La surface libre peut être décrite par la relation suivante :

$$z(r) = \frac{w^2}{2g} \left( r^2 - \frac{R^2}{2} \right) + h$$

$R$  représente le rayon du cristalliseur et  $r$  la distance par rapport à son centre. Lorsque des rayons parallèles atteignent la surface parabolique du liquide, ils sont réfléchis et convergent vers un point focal. Si l'on note  $H$  la hauteur de ce point de focalisation par rapport à la position d'équilibre de la surface libre du liquide (c'est-à-dire lorsqu'il n'est pas en rotation), alors :

$$Hw^2 = \frac{g}{2} - \frac{w^4 R^2}{4g}$$

Avec ce dispositif, déterminer la constante gravitationnelle

# Liste de matériel

- **Surfusion de l'étain**
  - réchaud à gaz
  - creuset + support
  - étain
  - thermocouple type K qui trempera dans l'étain fondu
  - système d'acquisition Picolog
- **Point triple du diazote  $N_2$** 
  - azote liquide
  - vase Deware
  - nouvelle pompe à membranes et collier de serrage de l'embout du tuyau
  - lecteur de température *Digisense* (exemplaire calibré 467.01)
  - une alimentation +15V et un multimètre numérique pour le capteur de pression
- **Isothermes de  $SF_6$** 
  - Appareil  $SF_6$
  - bain thermostaté avec circulation
  - Thermocouple
- **Supraconductivité**
  - kit supra
- **Transition ferromagnétique → paramagnétique**
  - ensemble : clou suspendu + écran thermique + chalumeau + aimant
  - thermocouple avec manchon en fer au bout + lecteur de thermocouple
- **Capillarité : Loi de Jurin**
  - ensemble : tube à essais + support + poire + éthanol
  - lampe quartz iode + alimentation
  - lentille + écran
- **Mesure de la viscosité du glycerol**
  - tube de glycerol + bille
  - chronomètre
  - mètre
  - pied à coulisse
  - balance
- **supraconductivité**
  - kit supra
- **Force centrifuge : déformation de la surface libre**
  - cristalliseur + tour de potier
  - noix + pince + potence
  - laser multi-faisceau
  - reglet
  - tachymètre

## Interféromètre de Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Perot

**Attention** : Le Michelson, le Mach-Zehnder et le Fabry-Perot sont des appareils fragiles, donc à manipuler avec précautions. Ne toucher en aucun cas les miroirs ou autres pièces optiques même si elles semblent très sales.

Les lasers utilisés ici ne sont pas dangereux mais évitez quand même de mettre votre œil dans le faisceau !

### Poste n°1 : *Mach-Zehnder : Mesure de l'indice de l'air*

- Eclairer le Mach-Zehnder directement avec le laser en vue d'obtenir des interférences bien contrastées (l'appareil est déjà préréglé). Visualiser la figure d'interférences en plaçant un objectif de microscope en sortie du Mach-Zehnder de manière à agrandir la taille de celle-ci sur l'écran.
- Placer **délicatement** une cuve de longueur  $L=4\text{cm}$  dans un des bras du Mach-Zehnder. Comment se transforme la figure d'interférences lorsque que l'on pompe dans cette cuve avec la pompe à main ?
- La relation théorique entre la variation de la différence de marche  $\Delta\delta$  et la variation de l'indice optique de l'air  $\Delta n = n_0 - n$  dans la cuve ( $n_0$  est l'indice de l'air à la pression atmosphérique  $p_0$  du jour et  $n$  l'indice à une pression  $p$ ) est donnée par l'expression :

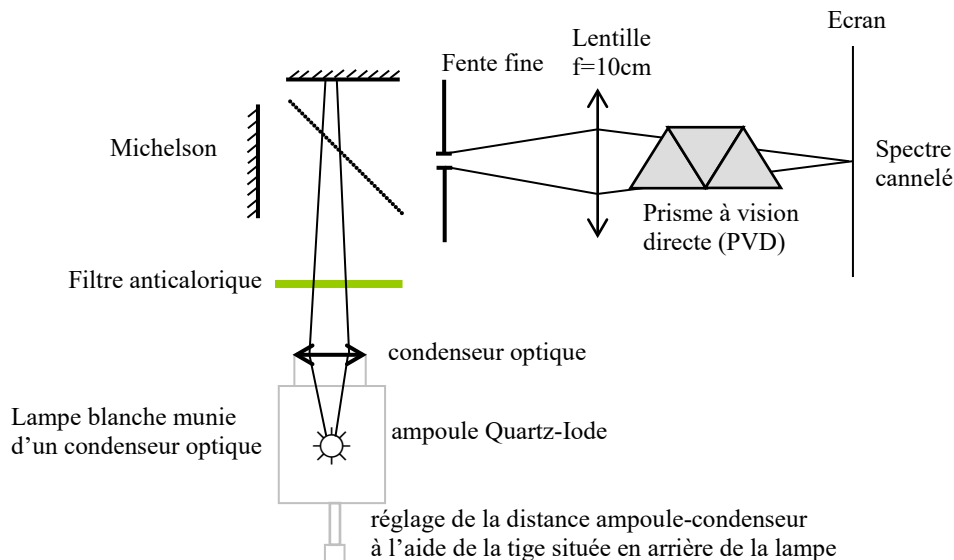
$$\Delta\delta = \lambda \Delta k = (n_0 - n)L$$

On comptera donc le nombre  $\Delta k$  de franges qui défilent en fonction de la pression différentielle  $\Delta p = p_0 - p$  dans la cuve. On remarque alors que le tracé de  $\Delta k = f(\Delta p)$  donne une droite permettant de calculer la valeur de l'indice de l'air  $n_0$  ( pour la détermination de  $n_0$  on utilisera, pour simplifier la formule, la définition d'un indice de réfraction à savoir  $n=1$  pour  $p=0$  )

### Poste n°2 : *Michelson : Spectre cannelé*

- A l'aide du laser effectuer le réglage du parallélisme entre la compensatrice et la séparatrice.
- Régler le Michelson en configuration dite "lame d'air" de manière à observer des anneaux bien contrastés avec la lampe à vapeur de Sodium.
- Régler maintenant le Michelson de manière à observer des interférences en lumière blanche. (**mettre un filtre anticalorique à l'entrée du Michelson**).
- A l'aide d'un système disperseur composé de plusieurs prismes (PVD), il est possible de faire facilement le spectre de la lumière sortant de l'interféromètre. On veillera tout d'abord à placer une fente fine en sortie du Michelson puis à faire son image géométrique sur l'écran avant de rajouter le PVD pour obtenir un spectre cannelé correct comme indiqué sur le schéma ci-dessous.

- A l'aide du spectre cannelé, il est possible de repérer la position exacte du vernier lorsque l'on est au contact optique, et donc de connaître l'épaisseur  $e$  de la lame d'air lorsque l'on déplace le miroir à l'aide du chariot. Compter le nombre  $k$  de cannelures obtenues pour une certaine valeur  $e$  (typiquement  $10\mu m$ ), et comparer avec la valeur théorique attendue :  $k = 2e\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$



### **Poste n°3 : Michelson : Mesure d'écart spectral**

- Régler le Michelson "à l'œil" de manière à observer des anneaux bien contrastés avec la lampe à vapeur de Sodium (voir compléments) puis projeter ces anneaux sur un écran.
- La raie jaune du Sodium est constituée d'un doublet d'écart spectral très faible. Mesurer l'écart spectral de ce doublet. Précision.

On donne :  $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d}$   $d$  étant la distance entre deux anticoïncidences.  $\lambda_{Na\text{ moyenne}} = 589,3nm$

### **Poste n°4 : Michelson : Mesure d'une longueur d'onde**

Il est possible, à l'aide d'un Michelson, de mesurer très précisément une longueur d'onde. Pour cela, il suffit de connaître le nombre de franges ou d'anneaux qui défilent pour une distance de chariotage  $d$  connue d'un des deux miroirs.

- Régler le Michelson de manière à observer des interférences bien contrastées à l'aide du laser à votre disposition (ne pas mettre son œil dans le faisceau).
- Déterminer la longueur d'onde du laser en comptant un nombre suffisant d'anneaux qui défilent. Précision.

**Poste n°5 : Fabry-Perot : Mesure d'écart spectral**

La lampe à vapeur de sodium (Na) contient un doublet spectral composé de deux longueurs d'ondes très proches l'une de l'autre. L'utilisation d'un interféromètre de type Fabry-Perot permet de distinguer nettement ces deux longueurs d'ondes et de mesurer leur écart spectral (compléments).

- Régler le parallélisme entre les deux miroirs du Fabry-Perot "à l'œil".
- Visualiser sur un écran les deux systèmes d'anneaux provenant du doublet jaune du Sodium.
- Y a-t-il une différence notable avec un Michelson réglé en lame d'air ? Interprétation.
- Mesurer l'écart spectral du doublet jaune du Sodium. Précision.

attention : il y a un rapport constant,  $\approx 8,25$  (si personne ne l'a modifié !), entre le vernier du Fabry-Perot et le déplacement réel du chariot.

on donne :  $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d}$   $d$  étant la distance entre deux antioïncidences.  $\lambda_{Na\text{ moyenne}} = 589,3\text{nm}$

**Poste n°6 : Etalon Fabry-Perot: Coefficient de réflexion et finesse**

L'étalon de Fabry-Perot est une cavité d'épaisseur optique fixe. Eclairée en incidence normale cet étalon permet de sélectionner, dans le spectre de la source, des domaines spectraux très étroits (application aux filtres interférentiels par exemple).

Le but de l'expérience ici est de visualiser les différents faisceaux lumineux qui traversent l'appareil et d'en déduire le coefficient de réflexion  $R$  des miroirs plans. On en déduira ainsi la finesse théorique du Fabry-Perot.

- Eclairer l'étalon de Fabry-Perot à l'aide d'un laser He-Ne en incidence oblique, et visualiser les différents faisceaux transmis que l'on numérottera de  $I$  à  $j$ .
- A l'aide d'une série de mesure d'intensités  $I_1$  à  $I_j$ , réalisées avec une photodiode, déterminer graphiquement le coefficient de réflexion des miroirs plan du Fabry-Perot.

On donne:  $I_j = I_1 R^{2(j-1)}$

En déduire la valeur de la finesse :  $F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$ .

note: la photodiode utilisée est linéaire en intensité à condition de travailler loin de la saturation.

## Interféromètre de Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Perot

### Matériel

#### **Poste n°1 : Mach-Zehnder : Mesure de l'indice de l'air**

- Mach-Zehnder
- Pompe manuelle + cuve.
- 1 diode laser verte. 1 objectif de microscope sur support. 1 écran.

#### **Poste n°2 : Michelson : Spectre cannelé**

- Michelson Didalab. 1 diode laser verte avec son objectif de microscope.
- 3 doublets  $f=10\text{cm}$ ,  $20\text{cm}$ ,  $1000\text{mm}$ .
- 1 prisme à vision directe. 1 fente fine. 1 diffuseur.
- 1 lampe Na + condenseur sur pied. 1 lampe blanche + 1 filtre anticalorique
- 1 écran.

#### **Poste n°3 : Michelson : Mesure d'écart spectral**

- Michelson Sopra ancien modèle + support. 1 diode laser verte avec son objectif de microscope.
- 1 lampe Na + condenseur sur pied. 1 diffuseur.
- doublet  $f=1000\text{mm}$ . 1 écran.

#### **Poste n°4 : Michelson : Mesure d'une longueur d'onde**

- Michelson + moteur
- 1 diode laser verte (avec son objectif de microscope ou une lentille  $f=5\text{cm}$ )

#### **Poste n°5 : Fabry-Perot : Mesure d'écart spectral**

- Fabry-Perot SOPRA d'écartement variable
- 1 doublet  $f=1000\text{mm}$ .
- 1 lampe Na + condenseur sur pied.
- 1 écran. 1 dépoli. 1 diode laser.

#### **Poste n°6 : Etalon Fabry-Perot: Coefficient de réflexion et finesse**

- 1 étalon Fabry-Perot + 1 laser He-Ne (petit à  $632,8\text{ nm}$ ) + supports.
- 1 photodiode amplifiée.
- 1 multimètre à affichage lumineux sur secteur. 1 écran.

### 1. Rappels théoriques

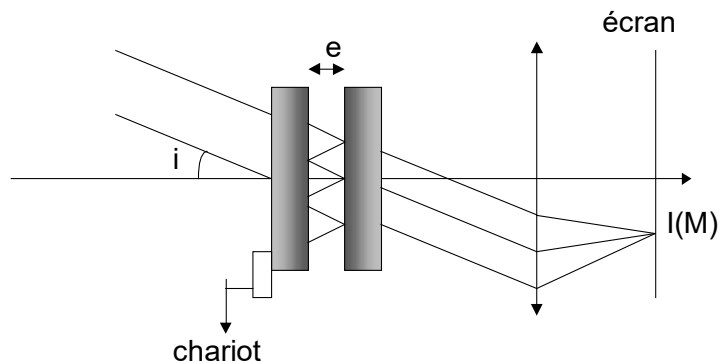
#### a. Finesse d'un Fabry-Perot

L'interféromètre de Fabry-Perot est constitué de deux miroirs plans de réflectivité  $R$  proche de 1. Les interférences ont lieu entre les ondes se réfléchissant sur les deux faces, elles sont appelées interférences à ondes multiples et sont localisées à l'infini, on les observera donc au foyer d'une lentille.

En incidence sous un angle  $i$ , le déphasage entre deux ondes successivement réfléchies ou transmises s'écrit :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2ne \cos i$$

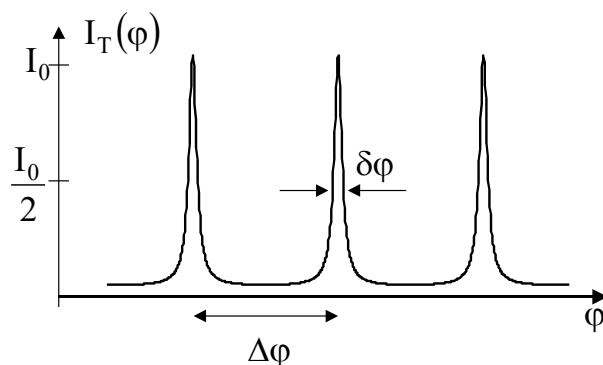
avec  $e$  la distance entre les deux miroirs,  $n$  l'indice du milieu séparant ces miroirs et  $\lambda$  la longueur d'onde incidente.



Le calcul de l'addition cohérente des ondes transmises, en tenant compte du coefficient de réflexion  $R$  identique pour les deux miroirs, donne finalement une intensité :

$$I_T = \frac{I_0}{1 + m \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \quad \text{avec } m = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

La figure d'interférence en variant  $\varphi$  a l'allure suivante :



En pratique, la variation de  $\varphi$  est soit une variation de  $e$ , soit de  $\lambda$ , soit de  $n$ . Dans notre cas il s'agit d'une lame d'air donc  $n=1$ . On définit la finesse  $F$  du Fabry-Pérot par

$$F = \frac{\delta\varphi}{\Delta\varphi} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

$F$  augmente lorsque  $R$  s'approche de 1 (miroirs de très bonne réflectivité), ce qui donne des pics de plus en plus étroits permettant d'obtenir une meilleure résolution spectrale.

### **b. Mesure d'écart spectral**

La lampe à vapeur de sodium (Na) contient un doublet spectral composé de deux longueurs d'ondes très proches l'une de l'autre. A l'aide du Fabry-Perot, une fois réglé finement, on observe une figure d'interférence constitué de la superposition de deux systèmes d'anneaux assez fins. En écartant progressivement les miroirs, il est possible de repérer facilement plusieurs coïncidences et anti-coïncidences des deux systèmes d'anneaux. Entre une anti-coïncidence et une coïncidence, la différence entre les ordres d'interférence a varié de  $1/2$  alors qu'il varie de 1 entre deux anti-coïncidences. Si  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont les longueurs d'onde du doublet, la variation de différence de marche entre deux anti-coïncidences est de  $\Delta\delta = 2d = \Delta p \lambda_1 = (\Delta p + 1)\lambda_2$  avec  $d$  le déplacement du chariot et  $\Delta p$  le nombre de franges ayant défilé pour la longueur d'onde  $\lambda_1$ . On peut alors montrer la relation suivante :

$$\Delta\lambda = (\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{2d} \approx \frac{\lambda_{moyenne}^2}{2d}$$

Remarque: Le Fabry-Perot est un interféromètre à ondes multiples contrairement au Michelson qui lui est un interféromètre à deux ondes. Pour imager cette différence importante, nous pouvons faire le parallèle avec les réseaux et les fentes d'Young. Le calcul et l'expérience montrent que dans le cas où l'on a des ondes multiples qui interfèrent, la résolution spectrale est bien meilleure, expliquant ainsi pourquoi il est possible de voir nettement les deux systèmes d'anneaux avec le Fabry-Perot. Les anti-coïncidences de deux longueurs d'ondes proches sont nettement visibles avec le Fabry-Perot alors que l'on observe des brouillages avec le Michelson.



## 2. Réglage et observation des anneaux

Le réglage consiste à rendre les deux miroirs strictement parallèles, de manière à se situer dans de bonnes conditions d'observation des interférences, menant à l'observation d'anneaux bien contrastés localisés à l'infini. Ce réglage est du même genre que celui utilisé pour le Michelson.

### a. Réglage grossier

Dans un premier temps on utilisera un faisceau laser que l'on enverra dans l'interféromètre. Si les miroirs ne sont pas parallèles, on observera en sortie de l'appareil de multiples points lumineux qu'il s'agira de superposer en s'aidant des réglages en rotation des miroirs. Une fois les différents points rassemblés, les miroirs sont alors « grossièrement » parallèles.

### b. Réglage fin

Une fois le réglage grossier terminé, on remplacera le laser par une lampe à vapeur de sodium (Na). Un diffuseur (simple papier calque en général), placé à l'entrée du Fabry-Pérot ou du Michelson juste après la lampe Na, permettra d'obtenir un nombre important d'anneaux que l'on observera directement à l'œil.

Si les miroirs sont strictement parallèles, le rayon des anneaux ne devraient pas se modifier lorsque l'observateur déplace son œil en sortie devant les miroirs de manière verticale ou horizontale.

Si ce n'est pas le cas, rendre les anneaux stables grâce aux réglages en rotation des miroirs : le principe est en fait de déplacer la tête le long d'un des diamètres vers le bouton de réglage sur lequel vous agissez. Dans le cas du Fabry-Perot, la rotation des miroirs s'effectue à l'aide de deux vis dont le rôle n'est pas indépendant (réglage à 45°) : on procédera donc par itération en jouant sur ces deux vis successivement jusqu'à un bon alignement.

Une fois le réglage fin terminé, on éclairera le Fabry-Perot à l'aide d'un faisceau de lumière convergente (lampe Na + condenseur) et on projettera les anneaux localisés à l'infini sur un écran à l'aide d'une lentille de focale  $f=1\text{m}$ .

note : Ce réglage est très sensible (à mieux que  $\lambda$  en variation d'épaisseur) : c'est aussi un avantage de ce type d'interféromètre lorsqu'on l'utilise en spectromètre.